

УДК 621.565.83  
МРНТИ 55.39.41, 44.31.41

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ НОЧНОГО РАДИАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД ВРЕМЕНИ

А.П. ЦОЙ<sup>1</sup>, А.С. ГРАНОВСКИЙ<sup>1</sup>, Д.А. ЦОЙ<sup>2</sup>,  
Р.А. ДЖАМАШЕВА<sup>1</sup>, А.Ю. АШИХИН<sup>1</sup>, Д.А. КОРЕЦКИЙ<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Алматинский технологический университет, Казахстан, Алматы)

(<sup>2</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург)

E-mail: teniz@bk.ru

*Произведены экспериментальные исследования работы холодильной системы радиационного охлаждения в условиях климата города Алматы в период с 7 по 29 июня 2018 года. В результате получена температура в аккумуляторе холода на 0,4...2,4 К выше минимальной за ночь температуры атмосферного воздуха. Скорость понижения температуры в аккумуляторе холода составила в ночное время в среднем 0,38 К/час. Среднее значение сбрасываемой системой тепловой мощности за период исследования составило 45±25,8 Вт. Обнаружено, что сбрасываемая тепловая мощность не снижалась в периоды выпадения атмосферных осадков в виде дождя.*

**Ключевые слова:** ночное радиационное охлаждение, радиатор, система хладоснабжения, теплоноситель, холодопроизводительность.

## ЖАЗ МЕЗГІЛІНДЕГІ ТҮНГІ РАДИАЦИЯЛЫҚ САЛҚЫНДАТУ ЖҮЙЕСІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

А.П. ЦОЙ<sup>1</sup>, А.С. ГРАНОВСКИЙ<sup>1</sup>, Д.А. ЦОЙ<sup>2</sup>,  
Р.А. ДЖАМАШЕВА<sup>1</sup>, А.Ю. АШИХИН<sup>1</sup>, Д.А. КОРЕЦКИЙ<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Алматы технологиялық университеті, Қазақстан, Алматы)

(<sup>2</sup>Санкт-Петербург ақпараттық технологиялар, механика және оптика ұлттық зерттеу университеті, Ресей, Санкт-Петербург)

E-mail: teniz@bk.ru

*2018 жылдың 7 маусымынан 29 маусымына дейінгі аралықта Алматы қаласының климаттық жағдайында тоңазыту жүйесінде радиациялық салқындату мақсатында эксперименттік зерттеу жүргізілді. Нәтижесінде аккумулятордағы температура түнгі уақыттағы атмосфералық ауаның ең төмен температурасынан 0,4...2,4К жоғары болды. Аккумулятордағы температураның төмендеу жылдамдығының орташа мәні түнгі уақытта 0,38 К/сағ болған. Зерттеу кезеңінде жүйенің шығаратын жылу қуатының орташа мәні 45±25,8 Вт құрады. Анықталды, жаңбыр түріндегі жауын-шашын жылу қуатын төмендеткен жоқ.*

**Негізгі сөздер:** түнгі радиациялық салқындату, радиатор, салқындату жүйесі, салқындатқыш (жылу тасымалдағыш), салқындату өнімділігі.

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE NIGHT RADIATION COOLING SYSTEM OPERATION IN THE SUMMER PERIOD OF TIME

A.P. TSOY<sup>1</sup>, A.S. GRANOVSKIY<sup>1</sup>, D.A. TSOY<sup>2</sup>,  
R.A. DZHAMASHEVA<sup>1</sup>, A.Yu. ASHININ<sup>1</sup>, D.A. KORETSKIY<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Almaty Technological University, Kazakhstan, Almaty)

(<sup>2</sup>Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg)

E-mail: teniz@bk.ru

*Experimental research of the radiation cooling system operation in the climatic conditions of the Almaty city in the period from June 7 to June 29 of 2018 has been carried out. As a result, the temperature in the accumulator was 0.4 ... 2.4 K higher than the minimum temperature of atmospheric air in the nighttime. The average rate of temperature decrease at night in the accumulator was 0.38 K/h. The average value of the cooling power of the system was  $45 \pm 25.8$  W. It was found that the cooling power did not decrease during periods of rain.*

**Keywords:** night radiative cooling, radiator, cold supply system, coolant, cooling capacity.

### **Введение**

Парокомпрессионные холодильные машины на данный момент являются наиболее распространенным видом холодильного оборудования. Они обладают высокой энергоэффективностью и удобны в эксплуатации. Однако для дальнейшего повышения энергоэффективности холодильного оборудования необходимо рассмотреть возможность использования принципиально-новых физических способов понижения температуры. Одним из таких способов охлаждения является радиационное охлаждение (далее РО). Сущность данного способа охлаждения заключается в следующем. Поверхность, обращенная к небу, при определенных условиях (отсутствии солнечной радиации и низком уровне содержания влаги в атмосфере) может излучать в инфракрасной части спектра больше тепловой энергии, чем получать обратно от окружающей среды [1,2]. Данный эффект носит название радиационного охлаждения (РО) и за счет него можно поддерживать температуру теплоносителя ниже температуры окружающего воздуха.

В последние годы был произведен ряд экспериментальных исследований холодильных систем с использованием РО [3–7]. Однако, мы не можем использовать данные о результатах работы холодильных систем из указанных исследований для проверки результатов компьютерного моделирования, проводимого при помощи разрабатываемой ком-

пьютерной модели [8], так как в большинстве случаев представленное описание конструкции экспериментальных установок и климатических условий не является достаточным для воспроизведения экспериментов со значительной точностью. Из-за этого предлагается провести исследование работы холодильной системы собственной конструкции и сбор данных о её работе. Данная работа должна дать более детальное представление о динамике изменения температур в холодильной системе с использованием РО, а также показать, как будет работать указанная система в условиях климата города Алматы в различных погодных условиях, в том числе во время дождя (что ранее не было исследовано).

### **Объекты и методы исследования**

Ранее разработана и изготовлена конструкция радиатора РАДМЗ, а также подготовлена экспериментальная холодильная система с ночным радиационным охлаждением (ХСНРО).

Принципиальная гидравлическая схема холодильной системы представлена на рисунке 1. Основными элементами холодильной системы являются: радиатор Р1, аккумулятор холода А1 и насос Н1. Теплоноситель из аккумулятора холода забирается насосом Н1 и нагнетается в радиатор Р1, где происходит его охлаждение. Охлажденный теплоноситель сливается в аккумулятор А1.

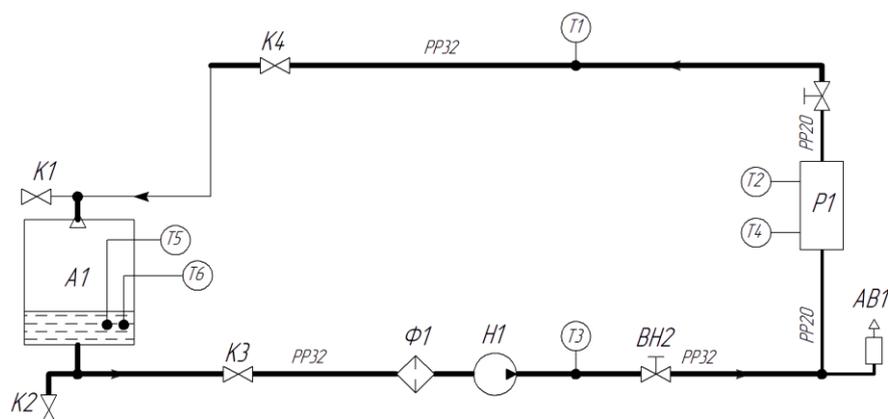


Рисунок 1 – Принципиальная гидравлическая схема холодильной системы ХСНРО: К1...К4 – кран шаровой; Н1 – насос; Ф1– фильтр; АВ1 – автоматический воздушный клапан; Р1 – радиатор; А1 – аккумулятор холода; Т1...Т6 – датчики температуры

Автоматический воздушный клапан АВ1 расположен в наивысшей точке холодильной системы и предназначен для спуска воздуха из радиаторов. Вентиль ВН2, используется для регулирования расхода теплоносителя через систему.

Методика проведения экспериментов следующая. В ночное время контроллер холодильной установки АСУНРО-1.К включает насос и производит запись об изменении температур теплоносителя в ключевых точках

системы, а также данные об температуре и влажности атмосферного воздуха. Настройки контроллера позволяют осуществлять периодическое отключение насоса после заданной наработки по времени. Для измерения температуры использованы датчики DS18B20. Для измерения относительной влажности и температуры атмосферного воздуха использован датчик DHT21.

Характеристики использованного аккумулятора холода представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики аккумулятора холода

№	Параметр	Ед. изм.	Значение
1	Конструкция	–	Кубическая пластиковая ёмкость (Еврокуб)
2	Внутренний объем	л	1200
3	Габаритные размеры	мм	1200x1000x1000
4	Материал теплоизоляции	–	Минеральная вата
5	Толщина теплоизоляции	мм	50

В аккумулятор холода заправлена вода в количестве  $100,73 \pm 0,5$  кг.

Для циркуляции теплоносителя используется насос модели: Wilo Star RS 25/6 (цент-

робежный циркуляционный насос с мокрым ротором), с рабочей мощностью 47 Вт.

Характеристики радиатора представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики радиатора

№	Параметр	Ед. изм.	Значение
1	Площадь излучающей поверхности	м <sup>2</sup>	2
2	Конструкция	–	Из медных труб с припаянным алюминиевым листом
3	Модель	–	РАДМЗ-1.00.00
4	Покрытие излучающей поверхности	–	белая краска «Радиаторная»
5	Габаритные размеры (длина x ширина)	м	2 x 1
6	Толщина излучающей пластины	мм	0,8
7	Расстояние между параллельными каналами для теплоносителя	мм	90

Холодильная система размещена в черте города Алматы. Вблизи от места установки радиатора на крыше здания отсутствуют какие-либо постройки или объекты, попадающие в поле зрения радиатора. Радиатор наклонен на  $15^\circ$  к горизонту и обращена на восток.

**Результаты и их обсуждение**

Наблюдение за температурой излучающей поверхности при выключенном насосе.

На первом этапе был проведен эксперимент по измерению температуры излучаю-

щей поверхности радиатора без циркуляции теплоносителя. Наблюдения проведены в период с 7 по 11 июня 2018 года.

Данные об изменении погодных условий, полученных с метеостанции [6], в заданный период времени представлены на рисунке 2. Во время эксперимента несколько раз шел дождь (эти периоды времени выделены серой заливкой).

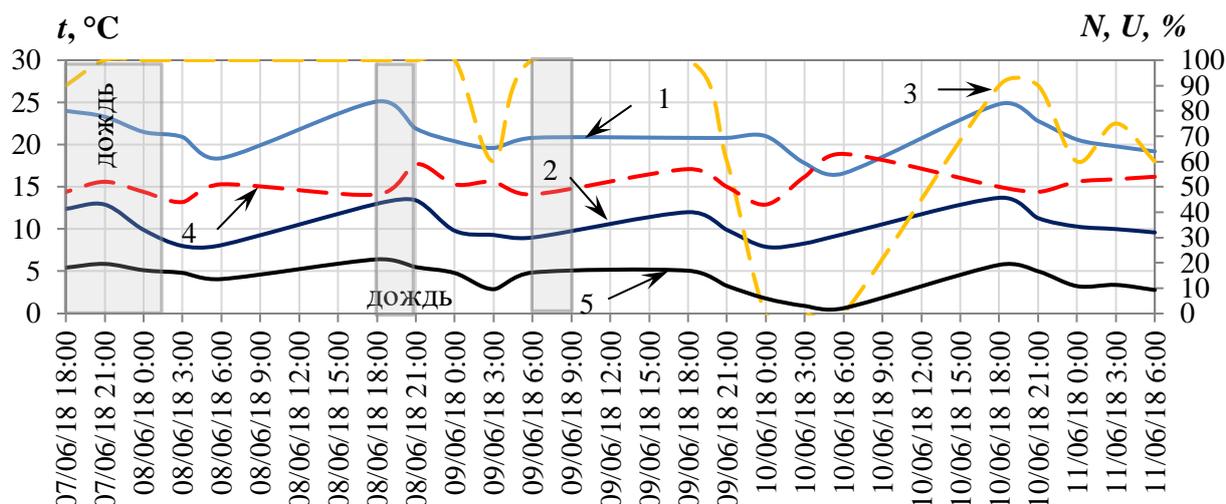


Рисунок 2 – Изменение параметров атмосферного воздуха по данным с метеостанции (с 7 по 11 июня 2018 года): 1 – температура; 2 – температура точки росы; 3 – общий уровень облачности; 4 – относительная влажность; 5 – расчетная температура ночного неба

Данные о температурах, полученные в ходе эксперимента при помощи датчиков холодильной системы, представлены на рисунках 3 и 4.

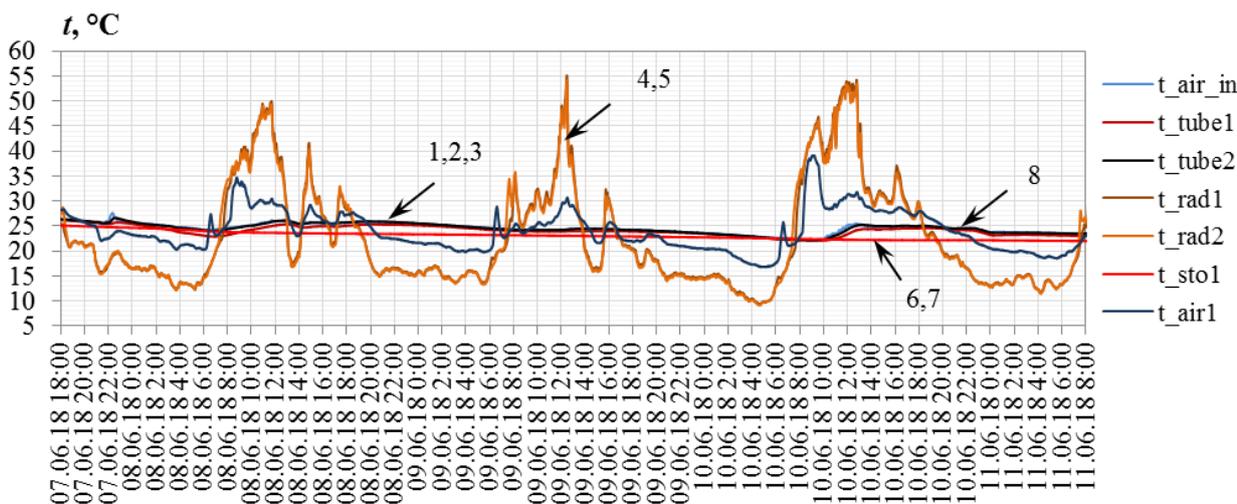


Рисунок 3 – Графики изменения температур в холодильной системе (с 07 по 11 июня 2018 года): 1 – температура воздуха внутри помещения; 2 – температура в трубопроводе на выходе из насоса; 3 – температура в трубопроводе на выходе из радиаторов; 4 – температура поверхности радиатора (в нижней части); 5 – температура поверхности радиатора (в верхней части); 6,7 – температуры в аккумуляторе холода; 8 – температура атмосферного воздуха

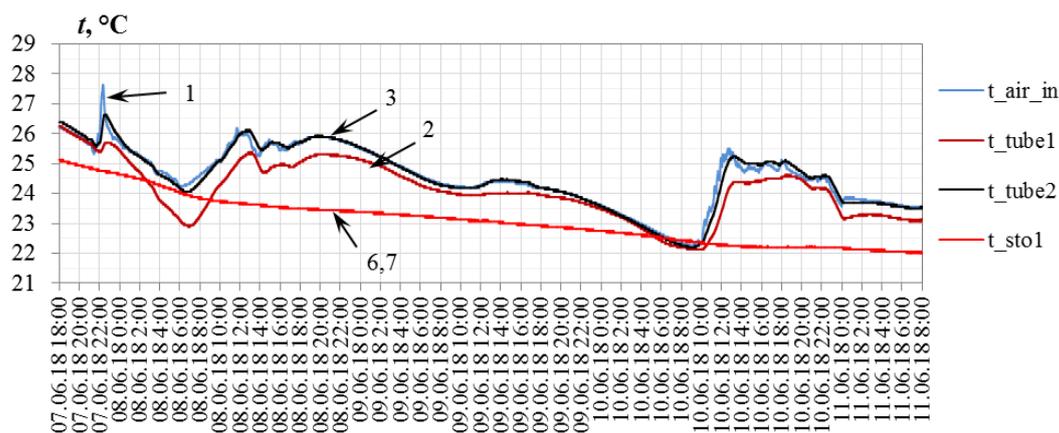


Рисунок 4 – Графики изменения температур в холодильной системе (с 07 по 11 июня 2018 года): 1 – температура воздуха внутри помещения; 2 – температура в трубопроводе на выходе из насоса; 3 – температура в трубопроводе на выходе из радиаторов; 6,7 – температуры в аккумуляторе холода; 8 – температура атмосферного воздуха

Температура излучающей поверхности в ночное время была в среднем на 6,5К ниже температуры атмосферного воздуха, даже не смотря на высокий уровень облачности, наблюдаемый в ходе эксперимента. Данный показатель может говорить о довольно большом значении охлаждающего эффекта в условиях климата города Алматы, так как, например, в условиях климата города Гонконг, в аналогичных наблюдениях температура излучающей поверхности даже в ясную ночь была всего лишь на 4К ниже температуры воздуха [9].

Наибольшая разница между температурой излучающей поверхности и температурой воздуха (-10К) наблюдается после рассвета Солнца в 6:00.

Далее проверим, была ли возможность конденсации влаги из атмосферного воздуха на излучающую поверхность. Для этого рассчитаем температуру точки росы для атмосферного воздуха по методике [10] и проверим, опускалась ли температура излучающей поверхности до температуры точки росы. На рисунке 5 расчетное значение температуры точки росы представлено кривой 4.

Практически всё время наблюдений, кроме периода с 4:00 до 6:00 утра 10 июня 2018 года, температура излучающей поверхности значительно выше (на 5...8 К) температуры точки росы воздуха. Из этого можно сделать вывод, что во время эксперимента не происходило конденсации влаги на поверхность радиатора.

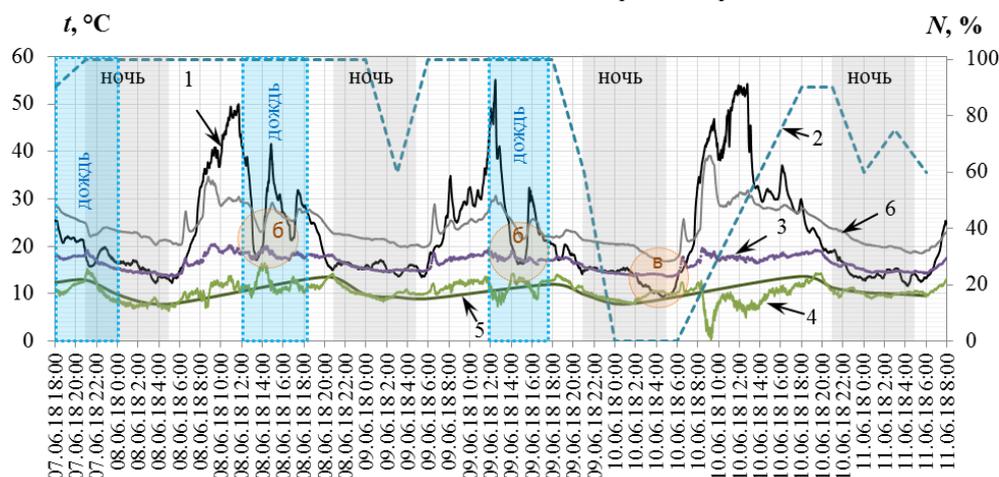


Рисунок 5 – Сравнение температуры излучающей поверхности с температурой воздуха: 1 – температура излучающей поверхности; 2 – общий уровень облачности по данным с метеостанции; 3 – расчетная температура воздуха по мокрому термометру; 4 – расчетная температура точки росы воздуха; 5 – температура точки росы воздуха по данным с метеостанции; 6 – температура атмосферного воздуха

Стоит отметить, что для конструкции радиатора без экрана, прозрачного для инфракрасного излучения, конденсация влаги на излучающую поверхность может стать фактором, ограничивающих его холодопроизводительность.

Динамика работы холодильной системы при включенном насосе.

Далее была проведена серия экспериментов с подачей теплоносителя в радиатор

при работе циркуляционного насоса. Контроллер настроен таким образом, чтобы насос непрерывно работал в течение 120 минут и после этого останавливался на 10 минут. Объемный расход теплоносителя в ходе эксперимента:  $229,78 \pm 21,7$  л/ч. Данные о погодных условиях во время эксперимента представлены на рисунке 6.

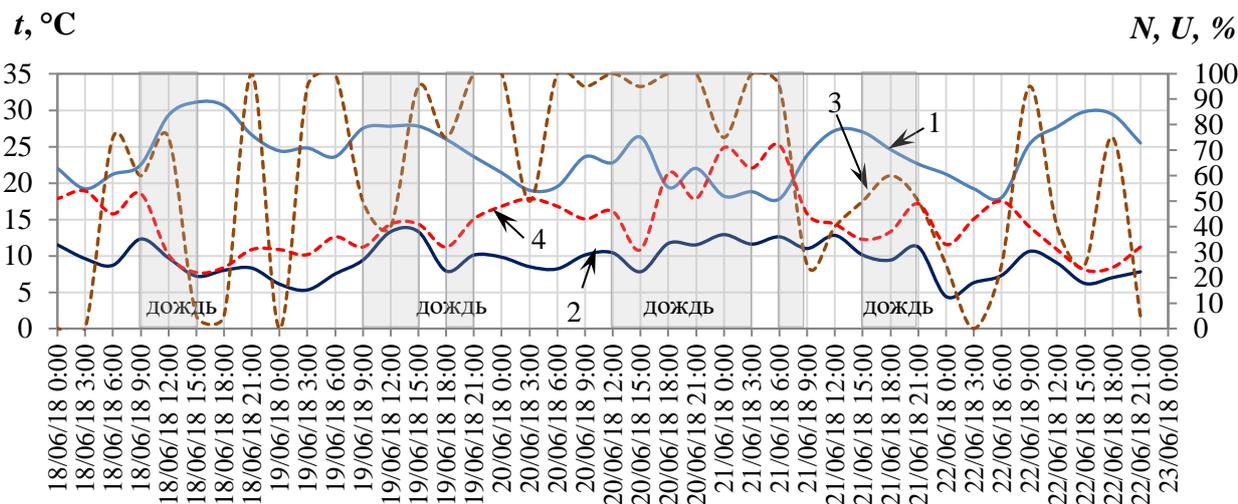


Рисунок 6 – Изменение параметров атмосферного воздуха по данным с метеостанции (с 18 по 22 июня 2018 года): 1 – температура; 2 – температура точки росы; 3 – общий уровень облачности; 4 – относительная влажность

Данные об изменении температур в холодильной системе представлены на рисунках 7 и 8.

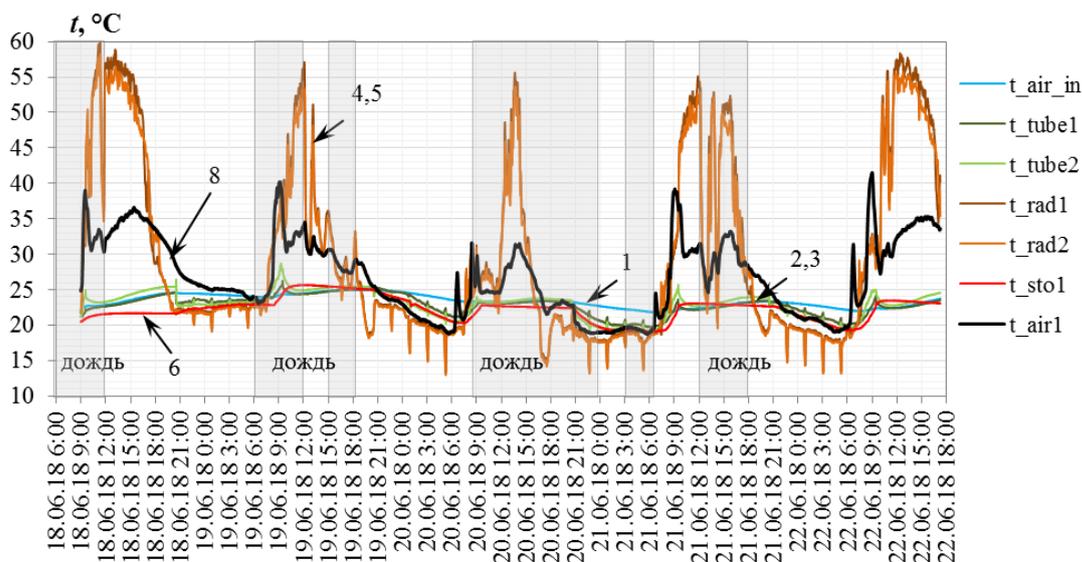


Рисунок 7 – Графики изменения температур в холодильной системе (с 18 по 22 июня 2018 года): 1 – температура воздуха внутри помещения; 2 – температура в трубопроводе на выходе из насоса; 3 – температура в трубопроводе на выходе из радиаторов; 4 – температура поверхности радиатора (в нижней части); 5 – температура поверхности радиатора (в верхней части); 6,7 – температуры в аккумуляторе холода; 8 – температура атмосферного воздуха

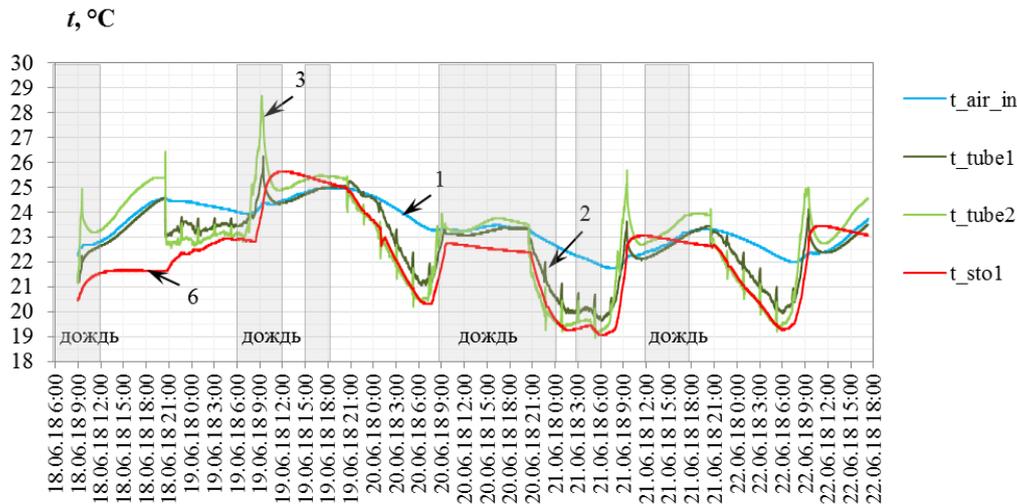


Рисунок 8 – Графики изменения температур в холодильной системе (с 18 по 22 июня 2018 года): 1 – температура воздуха внутри помещения; 2 – температура в трубопроводе на выходе из насоса; 3 – температура в трубопроводе на выходе из радиаторов; 6 – температуры в аккумуляторе холода

В первую ночь эксперимента теплоноситель не охлаждался, так как начальная температура в аккумуляторе была ниже температуры воздуха. В следующие ночи к 5:30 утра в аккумуляторе холода температура теплоносителя была на 0,2...1,9 К выше температуры атмосферного воздуха. Теплоноситель в аккумуляторе холода за ночь охлаждался на 3,2...4,2 К. Средняя скорость снижения температуры в аккумуляторе холода составляла 0,39 К/час.

Зная скорость изменения температуры в аккумуляторе холода можно определить сбрасываемую тепловую мощность системы:

$$q_0 = \frac{m_{sto} \cdot \bar{c}_{sto} \cdot \Delta t_{sto,i}}{\Delta \tau_i} = m_{sto} \cdot \bar{c}_{sto} \cdot \frac{v_{\Delta t}}{3600} \quad (1)$$

где  $m_{sto}$  – масса теплоносителя в аккумуляторе холода, кг;

$\bar{c}_{sto}$  – среднее значение изобарной массовой теплоёмкости теплоносителя в аккумуляторе холода, Дж/(кг·К);

$\Delta t_{sto,i}$  – изменение температуры в аккумуляторе холода за интервал времени, К;

$\Delta \tau_i$  – продолжительность интервала времени, с;

$v_{\Delta t}$  – скорость изменения температуры в аккумуляторе холода, К/час.

Расчетное среднее значение сбрасываемой системой тепловой мощности за три ночи составляет  $46,1 \pm 25,8$  Вт. Наибольшая сбрасываемая тепловая мощность наблюдалась в третью ночь проведения эксперимента (20.06.2018 в 22:30, рисунок 9).

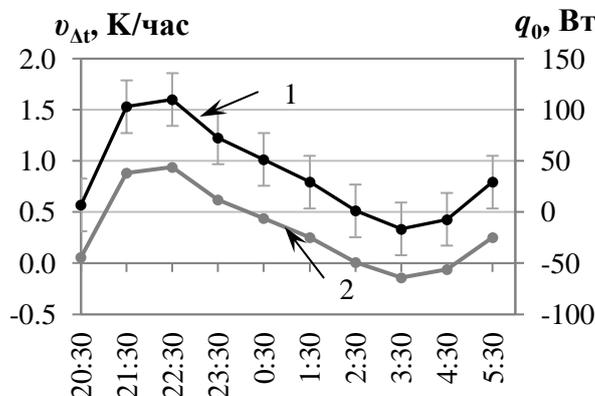


Рисунок 9 – Оценка сбрасываемой тепловой мощности холодильной системы (с 20 по 21 июня): 1 – средняя за предыдущий час сбрасываемая тепловая мощность системы; 2 – скорость понижения температуры в аккумуляторе холода за час

Интерес представляют данные за ночи с 20 на 21 и с 21 на 22 июня. Дело в том, что в первую ночь (с 20 на 21 июня) шел дождь, и уровень облачности достигал 100%. Во вторую ночь дождя не было. При этом к моменту времени 5:30 утра температура в аккумуляторе холода в обе ночи практически совпадает. Это значит, что сбрасываемая тепловая мощность системы в первую ночь из-за дождя не снижалась. Можно предположить, что это связано с тем, что во время дождя излучающая поверхность намокает и начинает интенсивно охлаждаться за счет испарительного охлаждения. Испарительное охлаждение компенсирует отсутствие радиационного охлаждения и в результате сбрасываемая тепловая мощность радиатора не снижается.

Аналогичный эксперимент был проведен повторно в период с 25 по 29 июня. Он проведен в сходных условиях и имеет результаты, аналогичные представленным выше.

#### **Заключение**

В результате экспериментов получены данные об изменении температур в холодильной системе. К концу ночи в результате работы холодильной системы получена температура в аккумуляторе холода на 0,4...2,4 К выше минимальной температуры атмосферного воздуха. Скорость понижения температуры в аккумуляторе холода составляла в ночное время в среднем 0,38 К/час. Среднее значение сбрасываемой тепловой мощности системы составило  $45 \pm 25,8$  Вт. Полученное среднее значение удельной сбрасываемой тепловой мощности радиатора имеет значение  $43,8 \pm 15$  Вт/м<sup>2</sup>. Данное значение сбрасываемой тепловой мощности соответствует значениям, полученным в экспериментальных работах, аналогичных данному исследованию [5].

Обнаружено, что во время проведения эксперимента, не смотря на атмосферные осадки в виде дождя, сбрасываемая тепловая мощность радиаторов не снижалась по сравнению с периодами, когда осадки отсутствовали, хотя ранее предполагалось, что атмосферные осадки должны вызвать значительное снижение сбрасываемой тепловой мощности.

Полученные данные в дальнейшем могут быть использованы для проверки результатов компьютерного моделирования работы холодильной системы, при проектировании холодильных систем с использованием радиа-

ционного охлаждения, а также при автоматизации систем радиационного охлаждения.

#### **Благодарности**

Представленная статья подготовлена в рамках проекта 0118PK00535, выполняемого на основе гранта AP05130918/ГФ, выделенного по программе гранатового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан по научным и (или) научно-техническим проектам на 2018-2020 годы.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Kimball, B. Cooling performance and efficiency of night sky radiators // Sol.energy. – 1985. – Vol. 34, № 1. – P. 19–33.
2. Samuel, D. G. L. Passive alternatives to mechanical air conditioning of building: A review / D. G. L. Samuel, S. M. S. Nagendra, M. P. Maiya // Build. Environ.–2013.–Vol.66. – P. 54–64.
3. Ahmadi, A. Investigation of Night (Radiative) Cooling Event and Construction of Experimental Radiator / A. Ahmadi, M.A. Karaei, H. Fallah // Int. J. Adv. Biotechnol. Res. – 2016. – Vol. 7, № 5. – P. 1180–1184.
4. Xu, X. An Experimental and Analytical Study of a Radiative Cooling System with Flat Plate Collectors / X. Xu, R. Niu, G. Feng // 9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE). – 2015. – Vol. 121. – P. 1574–1581.
5. Tevar, J. a. F. et al. Modelling and experimental analysis of three radioconvective panels for night cooling // Energy Build. – 2015. – Vol. 107. – P. 37–48.
6. Péan, T. et al. Nighttime radiative cooling potential of unglazed and PV / T solar collectors : parametric and experimental analyses // 8th Mediterranean Congress of Heating, Ventilation and Air-Conditioning (CLIMAMED 2015). – 2015.
7. Anderson, T., Duke, M., Carson, J. Performance of an unglazed solar collector for radiant cooling // Australian Solar Cooling. – Sydney: Australian solar cooling interest group, 2013.
8. Цой, А. П. Разработка технико-экономической компьютерной модели системы ночного радиационного охлаждения / А. П. Цой, А. С. Грановский, А. В. Бараненко, Д. А. Цой // Казахстан-Холод 2018: Сб. докл. межд. науч.-техн. конф. (15-16 марта 2018 г.). – Алматы: АТУ. – С. 27–31.
9. Tso, C. Y. A field investigation of passive radiative cooling under Hong Kong's climate / C. Y. Tso, K. C. Chan, C. Y. H. Chao // Renew. Energy. – 2017. – Vol. 106. – P. 52–61.
10. Barenbrug, A. W. T. Psychrometry and Psychrometric Charts. – 3rd Edition. – Cape Town: Cape and Transvaal Printers Ltd., 1974.